

34-38

爆炸焊 理论 计算 动态特性 5

内装药管动态特性的理论计算

王伟力

(西北核技术研究所, 西安 710024)

陈生玉

(西安二炮工程学院, 西安 710025)

TG456.6

摘 要 在圆管与圆管的爆炸复合研究中, 需要对管的动态参数做定量的估计。本文从工程应用角度出发, 将管看成由一系列微圆环组成, 给出微圆环在爆炸作用下的运动规律, 用准一维流模型给出管中爆轰产物流动方程, 并考虑管材强度及管间空气阻力影响, 建立了内装药管动态参数理论计算方法。用这种方法对几种材料进行了计算, 其结果与实测结果符合良好, 本文建立的方法对工程上的实际应用有参考价值。

关键词 爆炸复合 爆炸焊接窗口 炸药爆轰

1 前 言

不同金属管材进行爆炸焊接时, 常常内管装填炸药, 如图1所示, 其内管在炸药爆轰产物的作用下向外高速扩散, 并与管外以一定的碰撞角, 碰撞速度相碰撞, 来实现爆炸焊接。要实现良好的焊接, 这些焊接参数必须满足“爆炸焊接窗口”。对不同装药、不同管材、不同内外管间隙, 以及不同管壁厚度来说, 其碰撞角和碰撞速度不同。按目前的测试技术, 测定爆炸焊接参数并不困难, 还可用复杂的二维计算方法, 寻求理论计算

结果。但是, 要寻得合适的焊接参数, 必须进行相当数量的测试或二维计算工作, 这样做, 费时费力, 很不经济。对实际的工程应用来说, 未必有很大价值。

本文从工程应用角度出发, 建立了一种简单计算模型和方法, 并对铁、铜、铝管材进行了计算, 计算结果与实测结果符合良好, 这表明该方法准确可靠。

2 基本假设与守恒方程

工程上常见的管与管爆炸复合, 其内管管壁很薄, 通常小于2 mm, 管的径向尺寸满足 $(R_{10} - R_{20}) \ll R_{20}$ (参见图1), 在这种情况下, 我们假定管为薄壁管, 管材为不可压缩介质, 不计及冲击波在管壁内多次反射效应, 并假定管材在爆炸高压作用下, 立即进入塑性状态, 且满足刚塑性材料薄膜应力关系^[1]

$$\sigma_R - \sigma_\theta = -\sigma_y \quad (1)$$

式中: σ_R 为径向应力, σ_θ 为周向应力, σ_y 为屈服极限。

大量实验发现, 圆管爆炸复合前后, 其

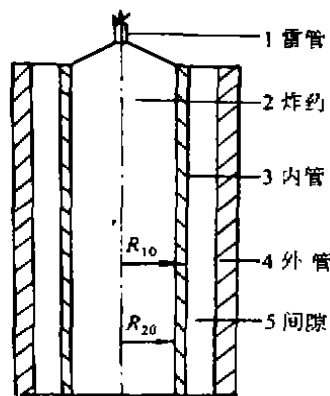


图1 爆炸复合装置图

管的长度几乎没有什么变化。基于这种事实, 作为轴对称问题的一个近似, 可以把内管看作由一系列微圆环组成, 每个微圆环在爆轰波及其产物作用下, 仅作轴对称的径向扩张, 而对径向扩张的微圆环, 可建立如下方程

$$RdR = R_0 dR_0 \quad (2)$$

$$\rho_{T0} \frac{\partial^2 R}{\partial t^2} = \frac{\partial \sigma_R}{\partial R} + \frac{\sigma_R - \sigma_\theta}{R} \quad (3)$$

式中: R_0 为 Lagrange 坐标, ρ_{T0} 为管材密度。其中 R 、 σ_R 和 σ_θ 都是 R_0 和 t 的函数。利用 (2) 式可将 (3) 式写成

$$\rho_{T0} \frac{\partial^2 R}{\partial t^2} \frac{\partial R}{\partial R_0} = \frac{\partial \sigma_R}{\partial R_0} + \frac{\sigma_R - \sigma_\theta}{R} \frac{\partial R}{\partial R_0} \quad (4)$$

积分 (2) 式得

$$R^2 = R_0^2 + f(t) \quad (5)$$

其中 $f(t)$ 为时间 t 的任意函数, 由 (5) 式得

$$\frac{\partial R}{\partial R_0} = \frac{R_0}{[R_0^2 + f(t)]^{1/2}} \quad (6)$$

$$\frac{\partial^2 R}{\partial t^2} =$$

$$\frac{1}{2} \frac{f''(t) [R_0^2 + f(t)] - \frac{1}{2} [f'(t)]^2}{[R_0^2 + f(t)]^{3/2}} \quad (7)$$

将 (1)、(5)、(6) 和 (7) 式代入 (4) 式, 再对 R_0 积分得

$$f''(t) \times \frac{1}{4} \ln \frac{R_{10}^2 + f}{R_{20}^2 + f} - [f'(t)]^2 \times \frac{1}{8} \frac{R_{10}^2 - R_{20}^2}{[R_{20}^2 + f(t)] [R_{10}^2 + f(t)]} + \frac{1}{\rho_{T0}} (p_{out} + p_y - p_{in}) = 0 \quad (8)$$

积分时已考虑了边界条件

$$\sigma_R|_{R_0=R_1} = -p_{out},$$

$$\sigma_R|_{R_0=R_2} = -p_{in}$$

这里 p_{out} 和 p_{in} 分别表示管外和管内压强。

(8) 式中

$$p_y = \frac{\sigma_y}{2} \ln \frac{R_{10}^2 + f}{R_{20}^2 + f}$$

由 (5) 式得

$$\begin{cases} R_1^2 = R_{10}^2 + f(t) \\ R_2^2 = R_{20}^2 + f(t) \\ R_1^2 - R_2^2 = R_{10}^2 - R_{20}^2 \\ f'(t) = \frac{d}{dt} (R_1^2) \\ f''(t) = \frac{d^2}{dt^2} (R_1^2) \end{cases} \quad (9)$$

将 (9) 式代入 (8) 式得

$$2 \ln \frac{R_1^2}{R_1^2 - (R_{10}^2 - R_{20}^2)} \frac{d^2}{dt^2} (R_1^2) - \frac{R_{10}^2 - R_{20}^2}{R_1^2 [R_1^2 - (R_{10}^2 - R_{20}^2)]} \left[\frac{d}{dt} (R_1^2) \right]^2 + \frac{8}{\rho_{T0}} (p_{out} + p_y - p_{in}) = 0 \quad (10)$$

其中:

p_y

$$= \sigma_y \ln \frac{R_1}{[R_1^2 - (R_{10}^2 - R_{20}^2)]^{1/2}} \quad (11)$$

初始条件为

$$\begin{cases} R_1|_{t=0} = R_{10} \\ \frac{dR_1}{dt}|_{t=0} = v_0 \end{cases} \quad (12)$$

应用 Runge-Kutta 法可求解方程 (10), 得到内管运动规律。

3 边界条件及初始条件

3.1 内边界压强 p_{in}

假定炸药起爆后为稳定的平面爆轰, 并且爆轰产物满足方程

$$p = B\rho^k \quad (13)$$

其中: B 、 k 为常数⁽²⁾。

管内爆轰产物的流动, 严格地说, 是一个二维流动。为了简单起见, 把它看成准一维变截面管流⁽³⁾, 取随爆轰波阵面运动的

坐标系 xOR , 爆轰产物为定常等熵流, 如图 2 所示, 其流动方程为

$$\rho\mu A = \rho_{E0}\mu_0 A_0 = C_1 \quad (14)$$

$$\rho\mu du + dp = 0 \quad (15)$$

$$dp = c^2 d\rho \quad (16)$$

其中: A_0 和 A 分别为图 2 所示的控制面面积, ρ_{E0} 和 μ_0 为 A_0 处的爆轰产物密度和速度, ρ 、 μ 、 p 和 c 分别为 A 处爆轰产物的密度、速度、压强和声速, C_1 为常数。

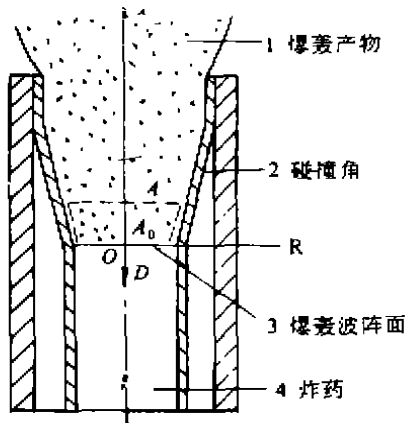


图 2 爆炸复合示意图

将 (13) 式和 (16) 式代入 (15) 式, 然后积分得

$$\begin{aligned} \mu^2 &= \frac{2}{k-1} c^2 = \mu_0^2 \\ &= \frac{2}{k-1} c_0^2 = C_2 \end{aligned} \quad (17)$$

式中: C_2 为常数, c_0 为 A_0 处爆轰产物初始声速。

$$\text{由 (13) 式得 } c^2 = Bk\rho^{k-1} \quad (18)$$

$$\text{由 (14) 式得 } \rho = \frac{C_1}{\mu A} \quad (19)$$

将 (18) 式和 (19) 式代入 (17) 式得

$$\begin{aligned} \mu^{k+1} A^{k-1} &= C_2 \mu^{k-1} A^{k-1} \\ &+ \frac{2Bk}{k-1} C_1^{k-1} = 0 \end{aligned} \quad (20)$$

且有

$$\begin{cases} A = \pi R_2^2 \\ A_0 = \pi R_{20}^2 \end{cases} \quad (21)$$

从 (14) 式和 (17) 式不难看出, 常量 C_1 和 C_2 可由图 2 所示的坐标系中 A_0 面处的 μ_0 、 ρ_{E0} 和 c_0 求得。确定了 C_1 和 C_2 后, 可由 (13) 式和 (18) ~ (21) 式求得 A 面处的爆轰产物参量 ρ 、 c 、 ρt 、 μ , 这里求得的 ρ 就是 ρ_{in} 。

3.2 外边界压强 P_{out}

若不考虑内外管之间的空气影响, 可取 $P_{out} = 0$, 若考虑管间空气的影响, 用轴对称特征线法可计算 P_{out} 。为了简单起见, 这里考虑到通常管的外径 R_{10} 比管间距大得多, 故近似用一维特征线法⁽³⁾ 计算, 则

$$\begin{cases} \frac{c_a}{c_{a0}} = 1 + \frac{\gamma-1}{2} \frac{v}{c_{a0}} \\ \frac{P_a}{P_{a0}} = \left(\frac{c_a}{c_{a0}}\right)^{\frac{2\gamma}{\gamma-1}} \end{cases} \quad (22)$$

其中: c_{a0} 和 P_{a0} 为常态下空气的声速与压强, c_a 为空气的声速, P_a 为所要求的管外压强, v 为管外壁面的扩张速度。即

$$v = \frac{dR_1}{dt}$$

3.3 管外壁面初速 v_0 的确定

炸药爆炸后, 在管壁内应产生冲击波, 而在薄壁管假设下, 不考虑波在管内的作用过程, 认为冲击波作用下管内外壁瞬态获得初速。这样, 初速作为计算的初始条件, 按冲击波守恒关系式, 管内壁面初速 v_T 与压强 P_T 有关系式

$$P_T = \frac{\rho_{T0}\rho_T}{\rho_T - \rho_{T0}} v_T^2 \quad (23)$$

取管材状态方程为 Murnagham 形式⁽⁴⁾

$$P_T = B \left[\left(\frac{\rho_T}{\rho_{T0}}\right)^n - 1 \right] \quad (24)$$

其中: ρ_T 和 ρ_{T0} 为材料的密度和初始密度, B' 和 n 为与材料相关的常数。

由于平面爆轰波为垂直于壁面的滑移爆轰波, 爆轰波与壁的作用, 将在爆轰产物中产生入射稀疏波, 稀疏波后产物的径向速度 v_E 和压强 P_E 由下式给出, 即

$$v_E = \frac{2k}{k^2 - 1} \{ 1 -$$

$$\left[\left(\frac{k+1}{\rho_{E00}} \frac{p_E}{D^2} \right)^{\frac{k-1}{2k}} \right] D \quad (25)$$

式中 ρ_{E00} 为炸药初始密度, D 为爆速。

依据界面匹配条件:

$$v_E = v_T, \quad p_E = p_T \quad (26)$$

由 (23) ~ (26) 式可得:

$$v_T = D \left[\frac{\rho_{E00}}{(k+1) \rho_{T0}} \right]^{\frac{1}{2}} \left(1 - \frac{k^2 - 1}{2k} \frac{v_T}{D} \right)^{\frac{1}{k-1}} \times \left\{ 1 - \left[1 + \frac{\rho_{E00} D^2 \left(1 - \frac{k^2 - 1}{2k} \frac{v_T}{D} \right)^{\frac{2k}{k-1}}}{(k+1) B'} \right]^{\frac{1}{n}} \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (27)$$

求解此式可得管内壁面初速 v_T 。

由 (9) 式不难求得管内外壁面初速度关系

$$v_0 = \frac{2R_{20}}{R_{10}} v_T \quad (28)$$

式中系数 2 为自由面反射的增值系数。

考虑管的径向初始速度后, 管内爆轰产物初始状态由 C-J 态变为如下方程描述状态

$$\begin{aligned} p_0 &= \frac{\rho_{E00} D^2}{k+1} \left[1 - \frac{k^2 - 1}{2k} \cdot \frac{v_T}{D} \right]^{\frac{2k}{k-1}} \\ C_0 &= \frac{kD}{k+1} - \frac{k-1}{2} v_T \\ \rho_{E0} &= \frac{k+1}{k} \rho_{E00} \left[\frac{(k+1) p_0}{\rho_{E00} D^2} \right]^{\frac{1}{k}} \\ \mu_0 &= \sqrt{\left(\frac{kD}{k+1} \right)^2 + \mu_T^2} \quad (29) \end{aligned}$$

由于在与爆轰产物连动的坐标系, 波后流动为声速, 因此, 沿轴向 C-J 态爆轰产物速度取声速 $kD/(k+1)$, 而不是取 $D/(k+1)$ 。另外, 由于爆轰产物气体沿径向获得初速 $v_E = v_T$, 因此, 将两向速度平方和的平方根做为爆轰产物气体初始速度, 当然, 这仅是处理方法之一。

4 计算结果

为了检验本文所建立模型的正确性, 首先对铁进行了计算。其管内装填炸药的成份、密度、爆速、以及管外形尺寸均采用文献 (5) 所述之值, 计算中所用到的其它参量见表 1 和表 2。

表 1 材料参数表

材料	σ_r (GPa)	ρ_{T0} (g/cm ³)	n	B' (GPa)
铁	0.8	7.8	4.16	45.0
铜	0.3	8.9	4.92	30.7
铝	0.2	2.7	5.36	14.7

表 2 空气参数表

γ	c_{a0} (km/s)	p_{a0} (Pa)
1.4	0.34	9.8×10^4

计算结果分别以图 3、图 4 和图 5 给出, (计算参数为: $D = 7.64$ km/s, $\rho_0 = 1.5$ g/cm³, $R_{10} = 5.78$ mm, $R_{20} =$

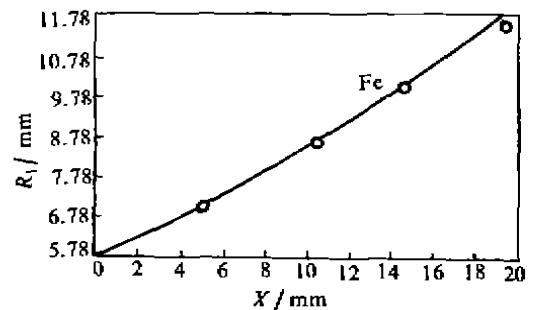


图 3 管形曲线

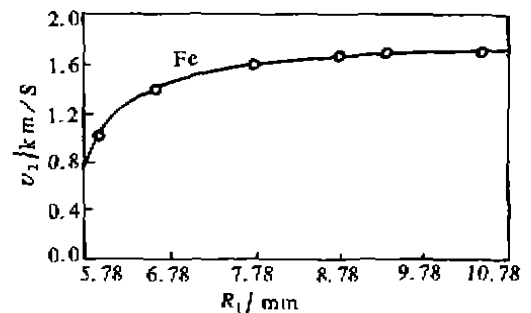


图 4 管外径与其速度变化曲线

4.78 mm)。图 3 为在爆炸作用下管形扩张曲线, 即管形曲线, 图中示出了实验测定结果⁽⁵⁾, 由图 3 可见, 计算结果与实验结果符合得很好。图 4 和图 5 分别给出管内、外径与其扩张速度的关系。

图 6、图 7 和图 8 (计算参数为: $D = 5 \text{ km/s}$, $\rho_{E00} = 1 \text{ g/cm}^3$, $R_{10} = 15 \text{ mm}$, $R_{20} = 13 \text{ mm}$) 给出在相同装药条件下, 铝管和铜管的计算结果。

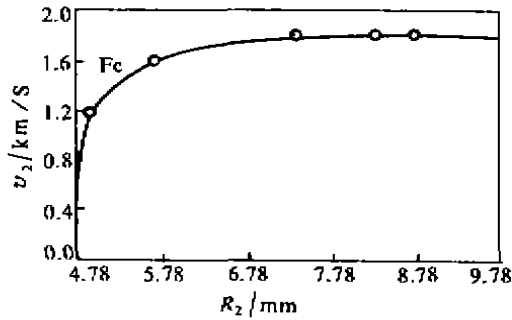


图 5 管内径与其速度变化曲线

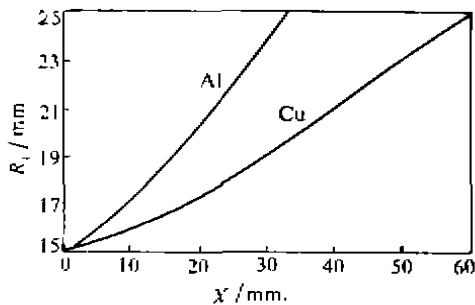


图 6 管形曲线

本文所建立的模型, 能比较容易地计算出管与管之间的爆炸复合参数, 为了得到最佳焊接, 可通过选择装药爆速、管壁厚度和间隙得到。应该指出, 当管扩张到一定程度时, 可能会发生破裂, 此时, 上述计算模型不再适用, 但实际爆炸复合情况, 内管不可

能扩张到这种程度。

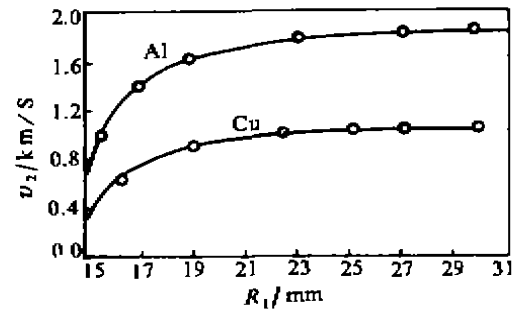


图 7 管外径与其速度变化曲线

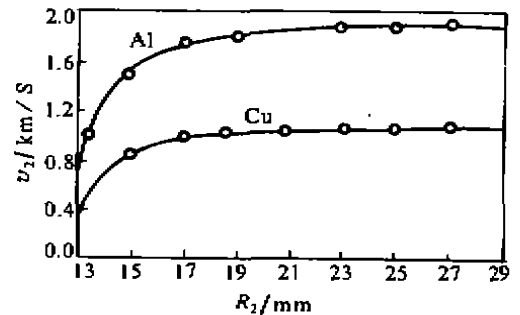


图 8 管内径与其速度变化曲线

参 考 文 献

- 1 布罗贝格 KB 著, 尹详础译. 弹性及弹塑性介质中的冲击波. 北京: 科学出版社, 1965:67~75
- 2 德列明 A H, 特罗菲莫夫 B C 等著, 沈金华, 马耀贤等译. 凝聚介质中的爆轰波. 北京: 原子能出版社, 1986:117~118
- 3 Philip A Thompson. Compressible-Fluid Dynamics. New York: McGRAW-Hill Book Company, 1972:374~402
- 4 经福谦等. 实验物态方程导引. 北京: 科学出版社, 1986:7~8
- 5 С Насарян Н С. Ф Г В. 1974:7(4):600~608

(1992 年 12 月 10 日收到)

(编辑 易毅刚)